



ミニ特集・3

マルテンサイトとベイナイトの基礎：
高強度化と高延性・高韌性への挑戦

組織キャラクタリゼーション： 複雑組織は解明されているか

Crystallographic Characterization of Lath Martensite and Upper Bainite

森戸茂一 島根大学 総合理工学部物質科学科
Shigekazu Morito 物理分野 物質構造講座

1 はじめに

ラスマルテンサイトは一般に高強度鋼に現れる組織であり、強度と靱性に関与する重要な組織であることが知られている。1960から1970年代にかけて、鉄鋼のマルテンサイトは様々な観点から多くの現象が観察され、解析された¹⁻⁵⁾。この頃にラスマルテンサイトの形態や機械的性質について多くのことが解明された。また、オースフォームやTRIPなど様々な組織制御技術が開発されたのもこの頃である^{6,7)}。

近年、観察および測定技術の進歩に伴い、今までとは異なる視点でマルテンサイトを観察できるようになった。特に透過型電子顕微鏡法/菊池図形解析(TEM/KP)や走査型電子顕微鏡法/反射電子回折図形解析(SEM/EBSP)などの局所方位解析技術⁸⁻¹¹⁾によって、従来の組織観察だけではなく組織の結晶学的な情報も同時に得られるようになった。この局所方位解析技術や観察・測定技術を使った組織の解析が行われ、マルテンサイトに関して新たな知見が得られている。

本稿では、最近得られた知見を踏まえ、ラスマルテンサイトおよび近年注目されている上部ベイナイトの特徴について述べる。

2 組織の構成

2.1 ラスマルテンサイト

マルテンサイト変態は剪断変形的に無拡散相変態する変態様式で、多くの金属で観察される。マルテンサイト変態は一般的に高温相を急冷もしくは拡散の起こりにくい低温での等温保持や応力負荷によって起こる。変態前の相(高温相)をオーステナイトや母相と呼び、変態後の相(低温相)をマルテンサイトと呼ぶ。通常、同一結晶構造を持つマルテンサイトの形態は1種類しかないが、鉄鋼の α' マルテンサイトの形

態は変態温度の高い順にラス、バタフライ、レンズ、薄板状と複数存在する¹²⁾。それぞれの特徴を表1に示す。薄板状はその名の通り板状の形態を持っており、オーステナイト-マルテンサイト界面(晶癖面)は $\{3\ 10\ 15\}\ \gamma$ である。多くの非鉄系マルテンサイトと同じく、変態応力を緩和する四つの結晶方位の異なるマルテンサイト晶で構成された形態を持つ。レンズマルテンサイトはマルテンサイト晶中央にミドリブと呼ばれる完全双晶で構成された板状の組織を内包した凸レンズ状の形態を持っている。ミドリブは元々薄板状マルテンサイトであり、それがレンズ状に成長することが知られている¹³⁾。また、比較的低温ではなめらかな凸レンズ状になるが、変態温度が上昇すると表面の形状が荒くなる。このときのオーステナイト-マルテンサイト界面は $\{111\}\ \gamma$ に近い¹⁴⁾。形態は薄板状マルテンサイトに近く、変態応力を緩和するマルテンサイト晶が組織を形成する。バタフライマルテンサイトは結晶方位の異なる二つの板が角度をつけて接合された形態を持っている¹⁵⁾。また、晶癖面は $\{225\}\ \gamma$ である。ラスマルテンサイト¹⁶⁾は細長い板状の形態を持ち、長手方向が $\langle 111 \rangle\ \gamma$ で盤面(晶癖面)が $\{111\} \sim \{557\}\ \gamma$ となっている。多くのマルテンサイト組織では一つのマルテンサイト晶の隣に同じ結晶方位を持つマルテンサイト晶が現れることはない。これは変態応力が大きくなってしまったためであるが、ラスマルテンサイト-特に低炭素ラスマルテンサイト-では同じ結晶方位を持つマルテンサイト晶が集まった独特の形態を持つことが知られている。

ラスマルテンサイトは旧オーステナイト粒を最大の単位としてサイズの大きい順にパケット、ブロック、サブブロッ

表1 鉄系マルテンサイトの形態と結晶学的特徴

形態	ラス	バタフライ	レンズ	薄板状
下部組織	転位	転位+双晶	転位+双晶	双晶
晶癖面	$\{111\}\ \gamma \sim \{557\}\ \gamma$	$\{225\}\ \gamma$	$\{259\}\ \gamma, \{3\ 10\ 15\}\ \gamma$	$\{3\ 10\ 15\}\ \gamma$
結晶方位関係	K-S	K-S	K-S, N-W, G-T	G-T
変態点	高	←		→ 低

ク、ラスで構成されている。図1に模式図を示す¹⁷⁾。各組織の定義は、順に、変態前のオーステナイト粒、晶癖面がほぼ同じマルテンサイト晶の集団、結晶方位がほぼ同じマルテンサイト晶の集団、オーステナイトとの結晶方位関係が同じマルテンサイト晶の集団、一つのマルテンサイト晶となっている。一般にマルテンサイト晶は、その形態から、マルテンサイトラス（もしくはラス）と呼ばれている。また、旧オーステナイト粒界、パケット境界、ブロック境界は大角粒界で、サブブロック境界、ラス境界は小角粒界である。図1 (a) は極低炭素鋼や18Ni マルエージ鋼など固溶炭素量の低い鋼の模式図である。低炭素鋼ラスマルテンサイトの特徴は各組織が大きく明瞭に観察される点で、ブロックが板状に観察され、その内部にサブブロックが明瞭に観察できる。固溶炭素量および窒素量が増加するとサイズ比は小さくなる¹⁸⁾。その模式図を図1 (b) に示す。パケットは細くなり、ブロックはマルテンサイトラス数個で構成されるようになる。また、ブロック内のサブブロックも確認しにくくなる¹⁷⁾。

2.2 結晶学から見たラスマルテンサイト

無拡散連携変態によって生じるマルテンサイトは変態前のオーステナイトと特定の結晶方位関係を持つ。ラスマルテンサイトの場合、オーステナイトとマルテンサイトの間に共通

最密面平行 ((111) γ // (011) α') かつ共通最密方向平行 ($[\bar{1}01] \gamma$ // $[\bar{1}11] \alpha'$) というK-S関係が成り立つといわれている。実際には共通最密方向平行が2~3°ずれていることが分かっている¹⁹⁾が、K-S関係として解析しても差し支えない場合が多い。また、晶癖面は共通最密面に近いことも知られている。K-S結晶方位関係を満たすマルテンサイト晶は、一つのオーステナイトから24通り(オーステナイトの最密面が4種類 × その最密面内に最密方向が3通り × マルテンサイトの最密面内に存在する最密方向が2通り)存在することになる。このような一つのオーステナイト(母相)から生じた、結晶方位の異なるマルテンサイト晶をバリエント(兄弟晶)という。ここで、オーステナイトとK-S関係をもつマルテンサイトのバリエントを表2のように定義する。この表を元に結晶学的にラスマルテンサイトの各組織を説明する。この表で、V1~V6、V7~V12、V13~V18、V19~V24はそれぞれ共通最密面が異なっている。つまり、これらの6種類のバリエントグループがパケットを構成していることになる。このグループのV1~V6を最密面が紙面に平行になるように表記したものが図2である。図2と表2を見るとV1-V4、V3-V6、V5-V2のバリエント対は[011] α' /10.5°の方位差関係を持つが、それ以外は大角粒界であることが分かる。このV1-V4、V3-V6、V5-V2のバリエント対がそれぞれ一つのブロックを構成していることになる。つまり、一つのパケットには3種類の結晶方位の異なるブロックが存在し、その中にバリエントの異なるラスの集団(サブブロック)が存在する。薄板状やレンズマルテンサイトの場合、たとえばV1-V6-V14-V15といったバリエントの組み合わせで構成されており、ラスマルテンサイトの場合と結晶学的に異なるバリエントの組み合わせを持っている^{20,21)}。

低炭素鋼のラスマルテンサイトではパケット内におけるブロックの並び方に決まった規則性はない。また、サブブロッ

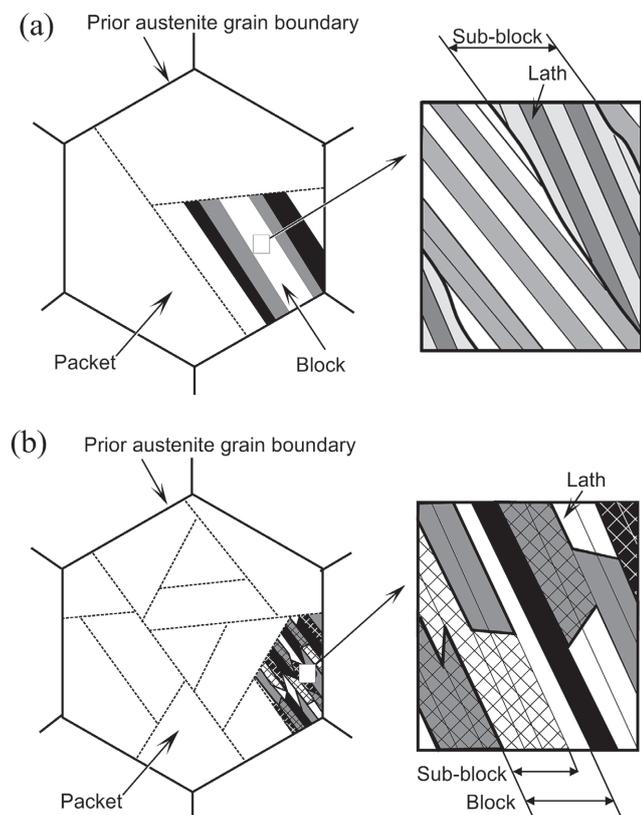


図1 ラスマルテンサイトにおける組織の模式図： (a) 低炭素鋼、(b) 高炭素鋼

表2 一つのオーステナイトからマルテンサイトがK-S方位関係を持って現れたときのバリエント

Variant No.	Plane parallel		Direction parallel		Rotation from Variant 1		[deg.] Angle
	(Austenite)	(/ (Martensite)	(Austenite)	(/ (Martensite)	Axis (Indexed by α')		
1	(1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[-1 0 1]	[/ -1 -1 -1]	[0.577	-0.577	60.0
2	(1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[-1 0 1]	[/ -1 1 -1]	[0.577	0.577	-60.0
3	(1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 1 -1]	[/ -1 -1 -1]	[0.000	0.707	0.707
4	(1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 1 -1]	[/ -1 1 -1]	[0.000	-0.707	-0.707
5	(1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[1 -1 0]	[/ -1 -1 -1]	[0.000	-0.707	-0.707
6	(1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[1 -1 0]	[/ -1 1 -1]	[0.000	0.707	0.707
7	(1 -1 1 )	)/( 0 1 1)	[1 0 -1]	[/ -1 -1 -1]	[-0.577	-0.577	49.5
8	(1 -1 1 )	)/( 0 1 1)	[1 0 -1]	[/ -1 1 -1]	[0.577	0.577	-49.5
9	(1 -1 1 )	)/( 0 1 1)	[-1 -1 0]	[/ -1 -1 -1]	[-0.615	0.186	-0.767
10	(1 -1 1 )	)/( 0 1 1)	[-1 -1 0]	[/ -1 1 -1]	[-0.739	-0.463	0.490
11	(1 -1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 1 1]	[/ -1 -1 -1]	[0.933	0.354	0.065
12	(1 -1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 1 1]	[/ -1 1 -1]	[-0.357	0.603	0.714
13	(-1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 -1 -1]	[/ -1 -1 -1]	[0.354	-0.933	-0.065
14	(-1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 -1 -1]	[/ -1 1 -1]	[-0.490	0.463	-0.739
15	(-1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[0 -1 -1]	[/ -1 -1 -1]	[-0.738	-0.246	0.628
16	(-1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[-1 0 -1]	[/ -1 -1 -1]	[0.659	-0.659	-0.363
17	(-1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[-1 0 0]	[/ -1 -1 -1]	[-0.659	0.363	-0.659
18	(-1 1 1 )	)/( 0 1 1)	[1 1 0]	[/ -1 -1 -1]	[-0.719	-0.302	0.626
19	(1 1 -1 )	)/( 0 1 1)	[-1 1 0]	[/ -1 -1 -1]	[-0.186	0.767	0.615
20	(1 1 -1 )	)/( 0 1 1)	[-1 1 0]	[/ -1 1 -1]	[0.357	0.714	-0.603
21	(1 1 -1 )	)/( 0 1 1)	[0 -1 -1]	[/ -1 -1 -1]	[0.955	0.000	-0.296
22	(1 1 -1 )	)/( 0 1 1)	[0 -1 -1]	[/ -1 1 -1]	[-0.302	0.626	0.719
23	(1 1 -1 )	)/( 0 1 1)	[1 0 1]	[/ -1 -1 -1]	[-0.246	-0.628	-0.738
24	(1 1 -1 )	)/( 0 1 1)	[1 0 1]	[/ -1 1 -1]	[0.912	-0.410	0.000

クも多く観察される。そのため、パケット内では10°程度の小角粒界が多く観察され、大角粒界も [011] α' /70.5°、[011] α' /60.0°、[011] α' /49.5°の粒界がほぼ1:2:1の割合で存在する²²⁾。([011] α' /70.5°の関係は [111] α' /60.0°の双晶関係と等価である。) 固溶炭素や窒素量が上昇するとブロック中のサブブロックが少なくなり、小角の粒界も少なくなる。また、大角粒界は双晶関係の [011] α' /70.5°粒界が炭素量の増加と共に増加する²³⁾。低炭素鋼では観察されなかったブロック内の方位回転も観察されるようになる。高炭素鋼ではブロックとサブブロックの区別はつきにくくなるが、従来の定義や低炭素鋼では大角粒界がブロック境界であることを考えると、高炭素鋼でも大角粒界をブロック境界ととる方が合理的と考えられる。

2.3 マルテンサイトラス

個々のマルテンサイトラスについての研究は透過型電子顕微鏡により多くの研究がされている。マルテンサイトラスの特徴としては、1) ラス内部に高密度の転位を含む、2) ラス間に残留オーステナイトが存在する、3) ラスの厚さはサブマイクロメートルであることが挙げられる。1) に関する研究は直接観察法^{24,25)}、間接測定法^{26,27)} 問わず多くの研究がされている。マルテンサイトラス内の転位密度は、測定法によって差はあるものの、だいたい 10^{15}m^{-2} オーダーで、固溶炭素量の増加に伴い増加することが指摘されている^{28,29)}。2) は極低炭素鋼を除く多くのラスマルテンサイトで観察される³⁰⁾。通常、マルテンサイトラス間にフィルム状として存在しているが、工具鋼のような一部のラスマルテンサイトではブロック状に存在している場合もある³¹⁾。残留オーステナイトの成因

は、変態応力の蓄積によってマルテンサイトラスの成長が一旦停止し、その間にオーステナイトへ侵入型原子の拡散が起こり、変態駆動力が低下するためと考えられている。3) も多くの研究が行われており、平均厚さは約 $0.2 \mu\text{m}$ とされている³²⁾。幅や長手方向のサイズに関する研究は等温ラスマルテンサイトの研究で幅 $2.8 \mu\text{m}$ 、長さ $100 \mu\text{m}$ という報告がある³³⁾。サブブロック内のマルテンサイト晶間の結晶方位差は約 3° であり、二種類の結晶方位をもつマルテンサイトラスが互い違いに並ぶ傾向がある²²⁾。

2.4 上部ベイナイト組織

上部ベイナイトの組織構成はラスマルテンサイトのそれと似ており^{34,35)}、組織の名称も旧オーステナイト粒、パケット、ブロック、ベイネティックフェライトと、ラスマルテンサイトに対応している。各組織単位の結晶学もラスマルテンサイトと同じである。また、ブロック内にサブブロックと同様の組織も存在する。また、パケット内のブロック境界の結晶学もラスマルテンサイトと同じであるが、双晶関係の [011] α' /70.5°粒界が多い。上述の組織の他に結晶学的パケット (crystallographic packets) と呼ばれる組織単位も提唱されている⁵²⁾。これは「晶癖面がほぼ同じマルテンサイト晶の集団」をパケットと定義するのに対し、「結晶方位差が 22° 以下のベイネティックフェライトの集団」を結晶学的パケットと定義している。この結晶学的パケットに含まれるバリエーションはすべて同じ Bain 対応^{1,2)} を有しており、一つの旧オーステナイト粒に3種類存在することになる。上部ベイナイトによっては、結晶方位の近いベイネティックフェライトの集団を単位として考え、結晶学的パケットで表記した方が理解しやすい場合がある。

上部ベイナイトの特徴としては保持温度 (変態温度) によって組織のサイズが変化することが挙げられる³⁵⁾。変態温度が高いときにはパケット中に含まれるブロックの数は少なく、条件によっては一つのパケットに一つのブロックのみ現れる。保持温度が低下するにつれてパケット中のブロックの数も増加する。このときの保持温度低下に伴う上部ベイナイトの組織変化は固溶炭素量増加に伴うラスマルテンサイトの組織変化とよく似ており、高温側では低炭素鋼ラスマルテンサイト、低温保持では高炭素鋼ラスマルテンサイトのブロック組織に近い。これは保持温度が高くなると変態駆動力が低下し、ベイネティックフェライト結晶方位の核生成サイト依存性 (バリエーション規制) が強まるためと考えられる。また、高温であるため未変態オーステナイトへの変態歪み緩和が起こり易く、自己調整が発現する必要がないことも理由に挙げられる。逆に保持温度が低いときには変態駆動力が高く、バリエーション規制に依存しないベイネティックフェライトが現れると

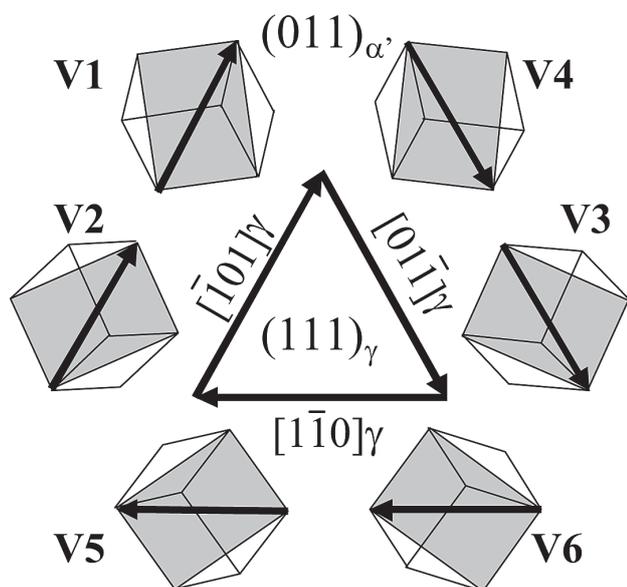


図2 単一パケット内における共通最密面と最密方向

考えられる。また、オーステナイトの硬化によってオーステナイトへの応力緩和が起こりにくくなり、自己調整を行う必要が生じるためブロックが細くなることも考えられている³⁵⁾。

上部ベイナイトではベイネティックフェライトは主にオーステナイト粒界から現れるが、粒界を挟んだ二つのオーステナイトと同時にK-S方位関係を持つベイネティックフェライトが現れる傾向がある³⁶⁾。このように粒界やオーステナイト粒による生成相への規制をバリエーション規制と言う。また、オーステナイト粒界にフェライトやマルテンサイトが存在していると、ベイナイトの生成が促進されるという報告³⁷⁾もある。オーステナイト粒界に起因したバリエーション規制はベイナイトだけでなく、ラスマルテンサイトでも報告されている³⁸⁾。

3 組織と機械的性質の関係

ラスマルテンサイトとベイナイトの組織と靱性との関係は、ブロックを破壊単位として考える場合が多い。これはBCCの劈開面が{001} BCCであることに起因する。図3はオーステナイトの001標準投影図上にマルテンサイトの{001} α' を記入した図である。これを見るとパケット内のブロック、図中に破線で示してあるV1-V4、V3-V6、V5-V2対は互いに大きく離れており、劈開面がブロック間で停止することが示唆される。このためブロックという微細な破壊単位がラスマルテンサイトの高靱性に寄与していると考えられている^{39,40)}。一方、ブロック間ではランダムな粒界と比べすべり系の接続性がよいいため、転位の蓄積が少なくなり靱性を向上させているという見解もある⁴¹⁾。

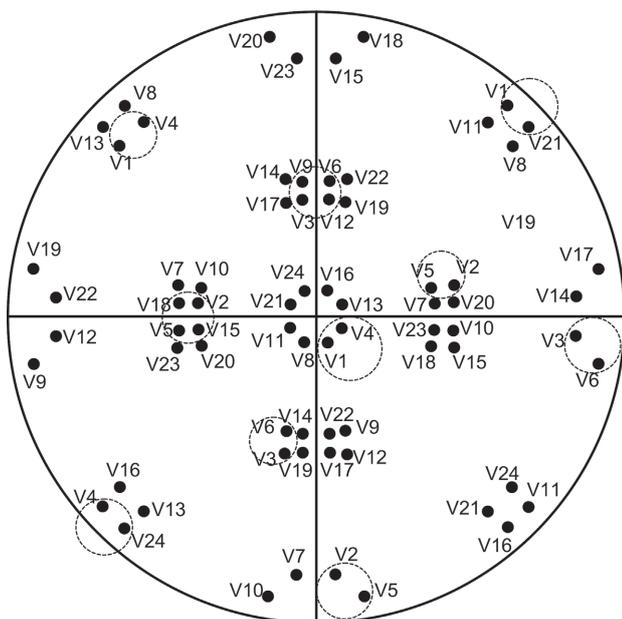


図3 オーステナイトの001標準投影図とマルテンサイトの{001}面

ラスマルテンサイトの降伏強度は、強化機構の加算則が成り立つと考え以下のように考えている⁴²⁾。

$$\sigma_{YP} = \sigma_0 + \sigma_P + \sigma_d + \sigma_s + \sigma_g$$

ここで σ_{YP} は降伏強度、 σ_0 は摩擦力、 σ_P は析出強化、 σ_d は転位強化、 σ_s は固溶強化、 σ_g は粒界強化を示している。それぞれの強化機構と組織との対応は、微細炭化物は析出強、マルテンサイト内の転位やラス境界は転位強化、固溶炭素や窒素は固溶強化、ブロックやパケットは粒界強化に影響するとされている。固溶強化で最も効果があるのは炭素であり、ラス内の転位は炭素量の増加と共に増加することなど、ラスマルテンサイトの強度因子は固溶炭素量に大きく依存する。粒界強化でも、オーステナイト粒径が同程度なら、ブロックやパケットは炭素量の増加と共に減少し、粒界強化量にも炭素量依存性が出てくる。そのためラスマルテンサイトの強度を炭素量で関係させた式を多く見かける⁴³⁾。

ここで組織に関係した強化因子である粒界強化について考えてみる。一般に粒界強化は大角粒界が有効であるとされており、ラスマルテンサイトやベイナイトではブロックが該当する。しかし、一般的に有効結晶粒径として旧オーステナイト粒やパケットを利用する場合が多い。低炭素ラスマルテンサイトにおいて、ブロック厚とパケット径の両方に対してHall-Petchの解析を行ったという報告がある⁴⁴⁾。その報告では、ブロック厚とパケット径は共に0.2%耐力の間にHall-Petchの関係が成り立つが、パケット径で求めたHall-Petch係数は添加元素に大きく依存しているのに対し、ブロック厚ではほぼ同じ値をとるとし、ブロック厚を粒界強化の有効結晶粒とした方がよいとしている。ただ、ブロックやパケットの形状は非常に複雑であり3次的に考える必要があること、サブブロックなどの小角粒界がどこまで粒界強化に効くかなど不明な点が多い。また、変形初期にはブロック内で平行最密面に沿ったすべり線が観察されている⁴⁵⁾ことから、今後詳細な研究が望まれる。一方、上部ベイナイトでは考え方が異なり、一般的にはベイネティックフェライトの厚さの逆数で強度と関係づけられている⁴⁶⁾。

ここまでは降伏強度を考えてきたが、次にラスマルテンサイト内でどのように組織が変形しているかを考えてみる。ラスマルテンサイトは小さい順に転位、ラス、サブブロック、ブロック、パケット、旧オーステナイト粒という組織で形成されている。また、ラス、サブブロック、ブロックの順で結晶方位差が大きくなっている。このことと今までの研究と照らし合わせると以下のようにラスマルテンサイトの変形が考察される。変形初期、まず、ラス内の転位が整理される⁴⁷⁾。次にラス境界が消滅もしくは分断される⁴⁸⁾。これは極低炭素

鋼で顕著な現象で、炭素鋼では加工初期にラス組織の消滅は観察されない^{48,49}。さらに変形を加えるとサブブロックが変形を受ける⁵⁰。次にブロックが変形を受け⁵¹、パケットが変形する。

4 おわりに

局所方位解析技術によりラスマルテンサイトや上部ベイナイトの詳細が明らかになってきた。また、機械的性質との関連づけも進んでいる。しかし、未だ不明な点が多い。これは1) 立体的な解析ができていない、2) 組織のばらつきに関する知見が少ない、3) 機械的性質の基本理論と組織が結びついていないことが挙げられる。現在、様々な解析手法が開発され、実際に使われ始めている。重要なものとしていくつか挙げると、Csコレクタなどを利用したTEM観察、放射光を利用したX線回折法、中性子線回折を利用した大型試料内部のその場観察、3次元解析による形態解析、SEM/EBSPによる残留応力や塑性歪の解析がある。この様な解析技術の進歩と共に、得られる情報と理論やシミュレーションとの連携も非常に重要である。その意味では、鉄鋼の専門家だけでなく幅広い分野の研究者との交流が最も重要なかもしれない。

参考文献

- 1) C.M.Wayman, 清水謙一 訳：マルテンサイト変態の結晶学, 丸善, (1969)
- 2) 西山善治：マルテンサイト変態－基本編－, 丸善, (1971)
- 3) 西山善治：マルテンサイト変態－応用編－, 丸善, (1974)
- 4) 牧正志, 田村今男：日本金属学会会報, 13 (1974), 329.
- 5) Martensite, ed.by G.B.Olson and W.S.Owen, ASM Int., (1992)
- 6) V.F.Zackay : Mater.Sci.Eng., 25 (1976), 247.
- 7) V.F.Zackay, E.R.Parker, D.Fahr and R.Bush : Trans. ASM., 60 (1967), 252.
- 8) S.Zaefferer and J.Appl.Crys. : 33 (2000), 10.
- 9) D.B.Williams and C.B.Carter : Transmission Electron Microscopy, Plenum Publishing, New York, (1996)
- 10) Electron Backscatter Diffraction in Materials Science, ed.by A.J.Schwartz, M.Kumar and B.L.Adams, Kluwer Academic/Plenum Publishers, (2000)
- 11) J.A.Wilkinson, G.Meaden and D.J.Dingley : Ultramicroscopy, 106 (2006), 307.
- 12) T.Maki : Mater.Sci.Forum, 56-58 (1990), 157.
- 13) T.Kakeshita, K.Shimizu, T.Maki and I.Tamura : Scripta Metall., 14 (1980), 1067.
- 14) R.L.Patterson and C.M.Wayman : Acta Metall.14 (1966), 347.
- 15) M.Umemoto, T.Hyodo, T.Maeda and I.Tamura : Acta Metall., 32 (1984), 1191.
- 16) 牧正志, 田村今男：鉄と鋼, 67 (1981), 852.
- 17) S.Morito, H.Tanaka, R.Konishi, T.Furuhara and T.Maki : Acta Mater., 51 (2003), 1789-1799.
- 18) T.Maki, K.Tsuzaki and I.Tamura : Trans.ISIJ, 20 (1980), 207.
- 19) P.M.Kelly, A.Jostsons and R.G.Blake : Acta Metall. Mater., 38 (1990), 1075.
- 20) H.Okamoto, H.Oka and I.Tamura : Trans.JIM, 19 (1978), 674.
- 21) J.C.Bokros and E.R.Parker : Acta Metall., 11 (1963), 1291.
- 22) S.Morito, X.Huang, T.Furuhara, T.Maki and N.Hansen : Acta Mater., 54 (2006), 5323.
- 23) S.Morito, S.Shibata and T.Maki : CAMP-ISIJ, 18 (2005), 1304.
- 24) P.B.Hirsch, A.Howie, R.B.Nicholson, D.W.Pashley and M.J.Whelan : Electron Microscopy of Thin Crystals, Krieger Publishing, Malabar (FL), (1977)
- 25) D.K.Chaudhuri, P.A.Ravindran and J.J.Wert : J.Appl. Phys., 43 (1972), 778.
- 26) G.R.Speich : Trans.AIME., 245 (1969), 2553.
- 27) G.K.Williamson and R.E.Smallman : Phil.Mag., 8 (1956), 34.
- 28) L.A.Nörstrom : Scand.J.Metall., 5 (1976), 159.
- 29) S.Morito, J.Nishikawa and T.Maki : ISIJ Int., 43 (2003), 1475.
- 30) G.Thomas : Metall.Trans.A, 9A (1978) 439.
- 31) 横井大円, 辻井信博, 横山嘉彦, 深浦健三：鉄と鋼, 89 (2003), 96.
- 32) A.R.Marder and G.Krauss : Trans.of ASM, 62 (1969), 957.
- 33) K.Wakasa and C.M.Wayman : Acta Metall., 29 (1981), 973.
- 34) H.K.D.H.Bhadeshia : Bainite in Steels, IOM Communications, (2001)
- 35) T.Furuhara, H.Kawata, S.Morito and T.Maki : Mater.Sci.Eng.A, 431 (2006), 228.
- 36) T.Furuhara, H.Kawata, S.Morito, G.Miyamoto and T.Maki : Metall.Mater.Trans.A, 39A (2008), 1003.

- 37) H.Kawata, K.Hayashi and M.Takahashi : Proc.of the 1st Int.Symp.on Steel Sci. (IS³-2007), Kyoto, Japan, (2007), 127.
- 38) S.Morito, J.Nishikawa, T.Ohba, T.Furuhara and T.Maki : Proc.of Int.Conf.on Martensitic Transformations 2008, Santa Fe (NM), (2008), submitted.
- 39) M.Wang, C.Wang, J.Shi, W.Hui and H.Dong : Proc. of the 1st Int.Symp.on Steel Sci. (IS³-2007), Kyoto, Japan, (2007), 203.
- 40) E.Bouyne, H.M.Flower, T.C.Lindley and A.Pineau : Scripta Materialia, 39 (1998), 295.
- 41) 仲井清眞, 恵智裕, 小林千悟, 濱田昌彦, 小溝裕一：鉄と鋼, 91 (2005), 882.
- 42) F.B.Pickering : Hardenability Concepts with Applications to Steel, American Institute of Min. Metall.and Petroleum Engin., Warrendale (PA), (1978), 179.
- 43) G.Krauss : Mater.Sci.and Eng., A273-275 (1999), 40.
- 44) S.Morito, H.Yoshida, T.Maki and X.Huang : Mater. Sci.Eng.A, 438-440 (2006), 237.
- 45) 道内真人, 南部将一, 石元良武, 井上純哉, 小関敏彦 : CAMP-ISIJ, 21 (2008), 1414.
- 46) J.P.Naylor : Metall.Trans.A, 10A (1979), 861.
- 47) 中島孝一, 藤村佳幸, 松林弘泰, 土山聡宏, 高木節雄 : 鉄と鋼, 93 (2007), 459.
- 48) S.Morito, T.Ohba and T.Maki : Mater.Sci.Forum, 558-559 (2007), 933.
- 49) R.Ueji, N.Tsuji, Y.Minamino and Y.Koizumi : Acta Mater., 50 (2002), 4177.
- 50) S.Morooka, Y.Tomota, Y.Adachi, S.Morito and T.Kamiyama : 鉄と鋼, 94 (2008), 313.
- 51) 早川正夫, 原徹, 松岡三郎, 津崎兼彰 : 日本金属学会誌, 64 (2000), 460.
- 52) A.Lambert-Perlade, A.F.Gourgues, A.Pineau, Acta Mater., 52 (2004), 2337-2348.

(2008年10月31日受付)

付録

結晶方位関係

FCC構造を持つオーステナイトからBCCもしくはBCT構造を持つマルテンサイトに結晶構造が変化するとき、マルテンサイト変態の場合は隣り合う原子の関係は変化せずに結晶構造だけが変化する。図4はFCC (x, y, z座標で格子定数が a_γ) からBCT (X, Y, Z座標で格子定数がa, c) に結晶構造が変化する際の原子の対応図である。この図ではFCCの結晶が $-z$ 軸方向に縮み、x, y方向に伸長してBCT構造となる。この様な結晶構造の対応をBain対応という。また、 $\{001\} \gamma // \{001\} \alpha'$ かつ $\langle 110 \rangle \gamma // \langle 010 \rangle \alpha'$ の対応を持つ方位関係(つまりRotate-Cube)をBainの方位関係という。Bain対応はFCCのx, y, z方向ごとに存在するため、3種類のバリエーションが存在する。次に述べるNishiyama-Wassermann (N-W) や Kurdjumov-Sachs (K-S) の方位関係はBainの対応を持つマルテンサイトに回転操作を加えることによって表すことができる。また、同じBain対応を持って現れたBCTの結晶方位は互いに近いものが多い。

Bain対応は結晶構造の対応だけを考慮しており、実際の方位関係を考えるにはマルテンサイトを回転させる必要がある。まず、最密面平行関係を整えるために $[100] \alpha'$ ($[\bar{1}10] \gamma$) 軸周りにマルテンサイトを反時計回りに回転させ $(111) \gamma$ と $(011) \alpha'$ を平行にする。このとき、 $\{111\} \gamma // \{011\} \alpha'$ か

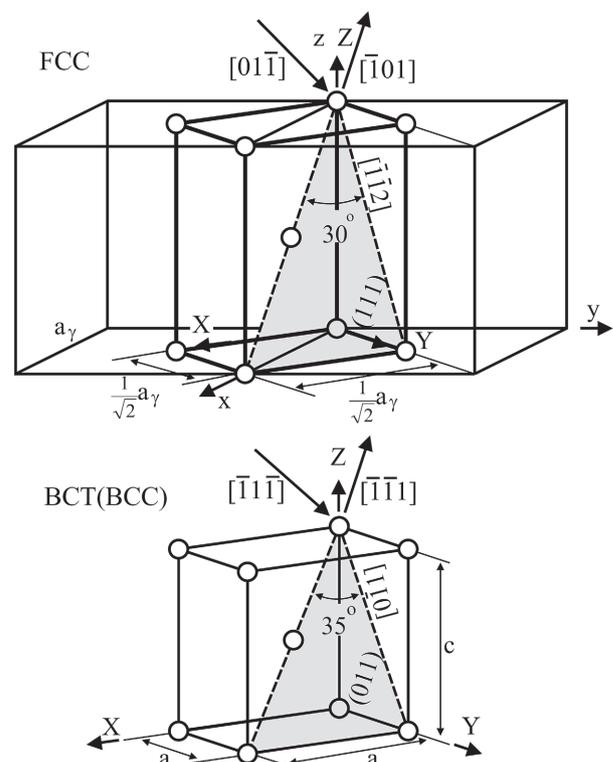


図4 FCCからBCT (BCC) へのBain対応

つ $\langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma} // \langle 100 \rangle_{\alpha'}$ の対応を持つ方位関係が現れる。これを N-W の方位関係という。この方位関係を持つときの $(111)_{\gamma}$ 面と $(011)_{\alpha'}$ 面の関係を図5に示す。この図で分かるようにオーステナイトとマルテンサイトの最密方向は平行になっていない。最密面平行関係かつ最密方向平行関係、つまり K-S の方位関係を得るには最密方向を平行にする必要がある。そのためには $(111)_{\gamma}$ 面内で $(011)_{\alpha'}$ を数度回転させ $[\bar{1}01]_{\gamma} // [\bar{1}1\bar{1}]_{\alpha'}$ か $[01\bar{1}]_{\gamma} // [\bar{1}1\bar{1}]_{\alpha'}$ のどちらかを平行にする必要がある。この様な操作を行うと一つの N-W から二種類の等価な K-S バリエントが現れることになる。この二種類の K-S バリエントがブロック内におけるサブブロックのバリエント対となる。

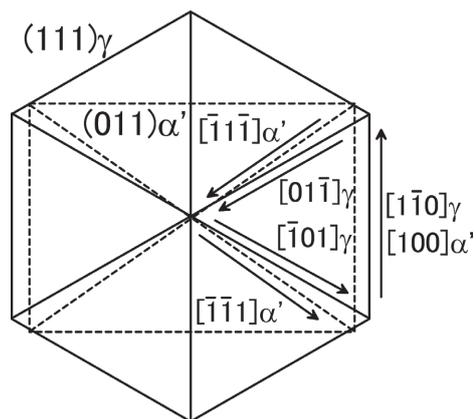


図5 N-W 方位関係を持つときの $(111)_{\gamma}$ 面 (実線) と $(011)_{\alpha'}$ 面 (破線) の関係